

混凝土灌注桩电法监测试验研究进展

胡 续¹, 吴荣新^{1,2}

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²矿山地质灾害防治与环境保护安徽普通高校重点实验室, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年7月3日; 录用日期: 2025年8月6日; 发布日期: 2025年9月28日

摘 要

随着现代建筑向高层化和大跨化发展, 混凝土灌注桩作为重要的基础形式, 其施工质量控制和超灌监测技术成为土木工程领域亟待解决的关键问题。传统的重锤法和压力感应装置测量法在实际应用中存在诸多局限性, 如测量精度低、易受环境因素干扰等, 难以满足现代工程对施工质量和成本控制的严格要求。电法监测技术通过利用混凝土、泥浆和水体之间的电性差异, 实现了对混凝土灌注高度的准确实时监测, 显示出巨大的应用潜力。本文系统阐述了电阻率法的基本原理及其在混凝土材料研究中的应用进展, 介绍了重锤法和压力感应装置测量法的原理及其存在的问题。电阻率法通过测量混凝土灌注桩不同部位的电阻率变化, 能够准确判断混凝土的灌注高度, 有效控制超灌量。研究发现, 电阻率法不仅能识别混凝土与泥浆、空气或水的界面, 还能通过线性变化规律量化超灌量, 为灌注桩施工质量控制和成本管理提供了新的技术手段。总结了电法监测技术在混凝土灌注桩超灌监测中的优势和挑战。尽管该技术在提高测量精度、减少材料浪费等方面表现出色, 但仍面临如何准确关联电法数据与混凝土实际质量、处理复杂环境中的干扰等问题。未来的研究应致力于开发标准化的监测方法, 优化电极参数设计, 并结合无线通讯技术实现远程实时监控, 以推动电法监测技术在混凝土灌注桩施工中的广泛应用。

关键词

混凝土灌注桩, 超灌监测, 电阻率法, 电法监测, 施工质量控制, 成本管理

Advances in Experimental Research on Electrical Method Monitoring of Concrete Cast-in-Situ Piles

Xu Hu¹, Rongxin Wu^{1,2}

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Key Laboratory of Mine Geological Hazard Prevention and Environmental Protection, Anhui Provincial Key Laboratory of Higher Education, Huainan Anhui

Received: Jul. 3rd, 2025; accepted: Aug. 6th, 2025; published: Sep. 28th, 2025

文章引用: 胡续, 吴荣新. 混凝土灌注桩电法监测试验研究进展[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1113-1125.

DOI: 10.12677/me.2025.135125

Abstract

With the development of modern buildings towards high-rise and large-span structures, concrete piles, as an important foundation form, face urgent challenges in civil engineering, such as construction quality control and overfill monitoring. Traditional weight-hammer and pressure-sensing device measurement methods have numerous limitations in practical applications, such as low measurement accuracy and susceptibility to environmental interference. These limitations make them difficult to meet the stringent requirements of modern engineering for construction quality and cost control. Electrical monitoring technology, by leveraging the electrical property differences between concrete, slurry, and water, enables accurate, real-time monitoring of concrete pouring height, demonstrating significant application potential. This paper systematically explains the basic principles of resistivity and its application in concrete material research. It also introduces the principles and challenges of the weight-hammer and pressure-sensing device measurement methods. The resistivity method, by measuring resistivity changes at different locations on a concrete pile, can accurately determine the concrete pouring height and effectively control the amount of overfill. Research has found that the resistivity method not only identifies the interface between concrete and mud, air, or water but also quantifies the amount of overfill through linear variation, providing a new technical approach for quality control and cost management in cast-in-place pile construction. This paper summarizes the advantages and challenges of electrical monitoring technology for overfill monitoring of cast-in-place concrete piles. While this technology has demonstrated excellent performance in improving measurement accuracy and reducing material waste, it still faces challenges in accurately correlating electrical data with actual concrete quality and handling interference in complex environments. Future research should focus on developing standardized monitoring methods, optimizing electrode parameter design, and integrating wireless communication technology to achieve remote real-time monitoring, thereby promoting the widespread application of electrical monitoring technology in cast-in-place concrete pile construction.

Keywords

Concrete Piles, Overfill Monitoring, Resistivity Method, Electrical Monitoring, Construction Quality Control, Cost Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土灌注桩凭借卓越承载力、高效施工效率及对复杂地质条件的广泛适应性,成为建筑工程、桥梁与道路基础等领域的首选基础形式。随着现代建筑向高层、大跨度发展,对地基承载力要求提高,桩基技术合理运用可控制建筑物沉降变形、提升结构整体性能,升级桩基承载能力与强化施工质量控制成为土木工程领域核心技术挑战[1][2]。泥浆护壁成孔灌注桩因适应性佳而广泛应用,但施工时孔壁坍塌等因素致孔径变化,仅凭混凝土灌注量难判断是否达设计标高,超灌现象普遍。超灌使桩身几何尺寸偏差,破坏桩基承载力分布与结构稳定性,甚至致桩基失效。我国年用桩量超百万根,超灌浪费混凝土数十万立方米,经济损失大。当前施工现场重锤探测法局限性明显,依赖主观判断,测量精度低,施工方为避风险常保守操作,桩顶超灌量2至3米,极端超4米,造成材料浪费,干扰后续施工[3]-[5]。

电法监测技术为解决超灌难题提供新视角,其利用混凝土、泥浆和水体电性差异,测量电阻率等参

数变化, 实现混凝土灌注高度准确实时监测。相较于传统方法, 电法监测数字化测量, 避免人为误差; 可连续动态监测, 及时发现异常; 测量精度高, 能精准控制超灌量。开展混凝土灌注桩超灌电法监测研究意义重大。工程质量上, 可确保桩基承载力达标, 提升结构安全性; 经济效益上, 减少混凝土浪费, 降低施工成本; 环境保护上, 避免混凝土过度溢出污染环境[6]-[8]。该技术研发不仅适用于建筑工程桩基施工, 还可用于尾矿坝、水坝等水工建筑物混凝土浇筑监测, 应用前景广阔。建立基于多参数电法测试的综合分析体系, 可实现施工过程实时监控, 为工程决策提供科学依据, 推动桩基施工技术智能化、精准化发展[9]-[11]。

2. 混凝土灌注桩超灌监测技术发展概况

2.1. 重锤法测量桩顶标高

在现代建筑工程中, 混凝土灌注桩是高层建筑、桥梁、港口等基础设施的重要基础, 超灌监测技术对保障施工质量与控制成本至关重要。工程界普遍采用的重锤法作为传统监测手段, 虽简便经济, 但面临诸多技术挑战[12]。重锤法依靠施工人员触觉判断混凝土灌注标高, 即用测绳悬挂重锤, 待其触及混凝土表面时, 通过测绳传来的震颤感知高度。在条件有限的小型工程或简单施工场景中, 该方法尚能满足基本监测需求(见图 1) [13]。

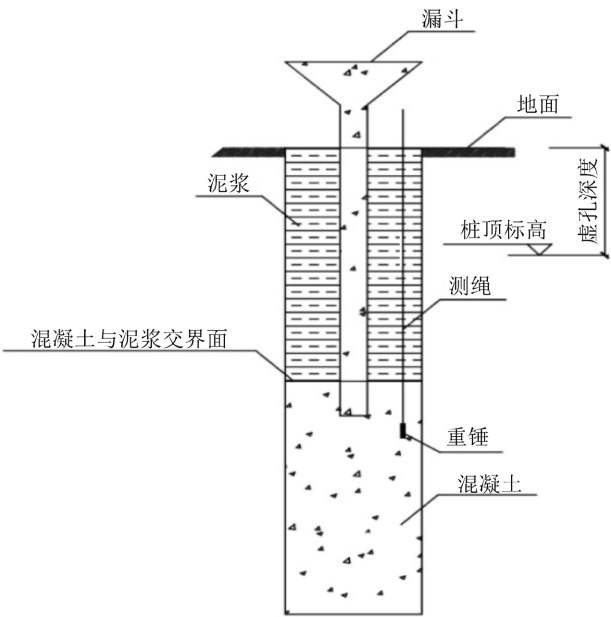


Figure 1. Schematic diagram of measuring the elevation of the pile top by the heavy hammer method
图 1. 重锤法测量桩顶标高示意图

然而, 随着现代施工工艺和混凝土材料性能的发展, 重锤法局限性凸显。施工环境方面, 现代灌注桩施工中混凝土顶面常覆盖 1.5 至 3 米厚的泥浆层, 其缓冲作用使重锤撞击力模糊, 施工人员难以准确感知混凝土高度。混凝土材料性能变化也带来挑战, 商品混凝土普遍采用小粒径骨料, 占比达七成以上, 小粒径骨料使混凝土表面更平滑, 重锤撞击反馈强度降低近四成, 导致施工人员难以准确判断灌注标高。桩顶埋深这一隐形变量同样影响原始测绳法准确性, 当桩顶埋深超过 15 米, 空孔段长度增加, 测绳下降摆动幅度增大, 测量误差累积, 施工人员难以准确判断重锤是否触及混凝土顶面, 只能凭经验估算, 超灌问题加剧。采用重锤法时, 超灌量普遍达 2 至 5 米, 个别复杂条件下超 8 米, 造成混凝土大量浪费,

增加工程成本, 还引发后续施工难题。每根桩平均浪费 3 至 5 立方米混凝土, 百根桩的桩基工程因超灌浪费混凝土 300 至 500 立方米, 额外增加数十万元材料费用。同时, 超灌量过大使破桩头工作量激增三成以上, 降低施工效率, 还可能影响桩身质量, 为工程埋下安全隐患[14]-[18]。

在现代混凝土灌注桩施工超灌监测领域, 重锤法因技术局限难以满足工程建设对施工质量和成本控制的高标准。为保障工程质量与有效控制成本, 探索研发更先进、精确、可靠的超灌监测技术, 已成为适应现代建筑工程发展需求的紧迫任务。

2.2. 压力感应装置测量法

混凝土灌注桩超灌监测技术的革新与工程实践需求紧密相连。传统测绳人工破桩法在现代施工中的局限, 推动工程界基于流体静力学原理开发出压力感应装置测量法。该技术标志着超灌监测从依赖人工经验判断迈向科学化、仪器化测量阶段, 但在实践中仍面临诸多问题。压力感应装置测量法利用泥浆与混凝土间的密度差异(泥浆密度 $1.02\sim 1.15\text{ g/cm}^3$, 混凝土密度 $2.3\sim 2.5\text{ g/cm}^3$)形成压力梯度, 通过高精度压力传感器实时捕捉桩孔内压力变化, 结合压力-深度数学模型精确计算混凝土面位置(见图 2) [19]。相较于测绳法, 该技术在测量方式上实现从主观触觉反馈到客观数据采集与分析的转变, 削弱了人为误差; 测量精度分辨率提升至 $\pm 0.5\text{ m}$, 可精准把控混凝土灌注高度; 还具备连续数据记录功能, 为后续施工工艺优化与质量评估提供数据支撑[20]-[22]。

然而, 该技术在实际应用中面临挑战。导管提拔速度影响测量准确性, 当提拔速度超过 0.5 m/min 时, 桩孔内流体运动剧烈波动, 产生涡流效应, 严重扰动压力传感器测得的压力值, 导致压力波动幅度达 $15\%\sim 20\%$ 。混凝土性能参数与泥浆特性对技术应用成效影响重大, 混凝土坍落度低于 180 mm 时, 界面过渡区模糊, 压力梯度变化平缓; 泥浆密度高于 1.12 g/cm^3 时, 压力感应装置信号灵敏度下降超 60% 。此外, 压力传感器零漂问题也是技术瓶颈, 随着监测时长和环境因素变化, 传感器零点漂移, 累计误差可达 1 至 1.5 米, 在大型桩基工程中影响尤为严重。在地质复杂区域或大直径桩基施工中, 该技术可靠性进一步下降[23] [24]。

尽管压力感应装置测量法在超灌监测技术上取得突破, 但在实际工程运用中仍受施工工艺、材料属性及传感器性能等多重因素制约, 存在明显局限性。传统监测方法在测量原理与工程适用性上的短板阻碍了施工质量与效率提升。面对现代工程建设规模扩大、施工环境复杂的趋势, 科研与工程技术人员需深入探索基于全新检测原理的超灌监测技术, 以保障工程质量、降低成本, 推动建筑工程行业高质量发展[25]-[27]。

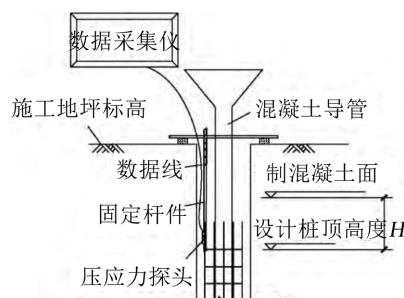


Figure 2. Schematic diagram of pressure sensing device measurement method

图 2. 压力感应装置测量法示意图

2.3. 电阻率法在混凝土中的研究进展

在当前建筑工程领域中, 针对灌注桩超灌量的精准、有效控制, 仍面临着诸多严峻挑战。尽管超灌

问题对工程质量、成本控制以及施工效率等方面均有着不可忽视的影响,但目前可应用于实际工程、切实解决该现象的控制手段却相对匮乏,难以满足日益增长的工程需求。近年来,随着材料科学与检测技术的不断发展,电阻率法作为一种具有潜力的无损检测手段,在混凝土材料研究领域取得了令人瞩目的长足进展。该技术基于混凝土材料在不同状态下电阻率特性的差异,通过精确测量和分析电阻率变化,为混凝土灌注桩超灌量的监测与控制提供了全新的思路和方法[28]-[30]。具体而言,电阻率法在混凝土材料研究领域的进展主要体现在以下几个方面:

(1) 电阻率法在水泥水化及混凝土性能研究中的应用

电阻率法被众多学者用于深入探究水泥水化机理。Xiao L. Z.团队发现水泥溶解饱和点与电阻率最低值对应,验证了电阻率法评估水化程度的可靠性[31]。曾晓辉、隋同波等剖析了电阻率与水化放热曲线关系,为理解水化过程提供新视角[32]-[35]。魏小胜与肖莲珍揭示初始电阻率和孔隙率对水化过程的影响,构建水灰比与电阻率定量关系模型,优化混凝土配比[36]-[68]。张丽君将其应用拓展至掺外加剂混凝土水化研究[39],Xiao 等则用于减水剂优选,提升混凝土性能。

(2) 混凝土性能评估新视角

电阻率法在混凝土力学性能评价中具有独特优势。肖忠明建立抗压强度与水泥浆体电阻率线性关系模型,实现混凝土强度快速评估[40]。魏小胜团队研究不同类型水泥养护期间强度发展规律,支持水泥类型选择[41]。Backe 等将其应用于油井水泥强度监测,保障石油工程安全[42]。Yan Liu 等证实钢筋混凝土强度特性与电阻率及钢筋参数的相关性,为结构设计提供精确理论依据[43]。

(3) 耐久性研究新进展

电阻率法在混凝土耐久性研究中表现出良好适用性。Zhendi Wang 团队将其应用于冻融循环研究,捕捉材料损伤演变规律[44]。Taijiro Sato 和 James J. Beaudoin 揭示电阻率与残余变形关系,为理解极端环境下混凝土性能变化提供线索[45]。桂志华等发现冻融次数与电阻率变化的非线性关系,确定 50 次冻融循环为临界点[46]。Yining Ding 团队采用导电混凝土,提高冻融环境下阻抗变化检测灵敏度,为耐久性监测提供新技术手段[47]。

然而,电学方法在混凝土结构监测领域的应用研究存在阶段性局限。学界长期聚焦于硬化后混凝土的静态电性参数表征及其与宏观性能的相关性研究,缺乏对新拌混凝土水化反应初始阶段动态电阻率演化机制的深入探索。本文旨在系统梳理并整合现有电法监测技术与方法,聚焦混凝土灌注桩超灌过程,深入论述电法技术在此场景下的应用潜力、监测原理、动态响应特征及挑战,为弥补研究不足提供实践依据与技术参考[48]-[50]。

3. 电法监测基本原理

3.1. 电阻率原理

电阻率法是一种基于混凝土灌注桩与周围介质(如土壤、岩石等)及桩身内部不同部位电阻率差异实施监测的有效手段。混凝土电阻率受其组成成分(水泥、骨料、水等)、孔隙率、含水量及缺陷情况等多种因素制约,正常情况下会在一定范围内波动。当桩身出现缩径、离析、空洞等缺陷时,缺陷部位电阻率会发生显著改变。具体而言,缩径部位因混凝土截面积减小,电阻率相对增大;离析部位因骨料与水泥浆分离导致孔隙率增大,电阻率亦随之增大;空洞部位电阻率远大于混凝土,在监测结果中呈现明显高阻异常。实施电阻率测量时,需将电极按一定间距布置于测区钢筋骨架上。随后,利用电法主机控制测量电极与供电电极,通过微机进行快速自动数据采集。数据处理后,可获得相关地电断面分布图。其中,供电电极用于测量电流 $I(A)$,电位电极用于测量 MN 两电极间的电位差 $\Delta U(V)$ 。依据视电阻率 $\rho_s(\Omega \cdot m)$ 计算公式,可算出混凝土电阻率,进而判断桩身是否存在缺陷以及缺陷的类型与程度[51]-[54]。

$$\rho_s = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

(1)为 ρ_s ($\Omega \cdot m$)公式, 其中, K 被定义为装置系数, 扮演着至关重要的角色。在实际监测过程中, 我们向混凝土灌注桩施加稳定的电流, 随后测量桩身不同部位间的电位差。借助欧姆定律的智慧, 我们能够精确计算出桩身的电阻率分布图。在这一过程中, 四电极法成为了常用的测量装置, 它巧妙地利用两个供电电极向桩身输送电流, 而另外两个测量电极则负责捕捉电位差, 从而精准地获取桩身的电阻率值。通过对这些电阻率值的深入分析, 我们能够洞悉桩身的完整性及其潜在的缺陷情况[55]-[57]。

3.2. 电阻率测量方法

随着智能建筑兴起与功能化建筑材料发展, 导电混凝土因兼具传统混凝土力学性能及导电、发热、电磁屏蔽等特殊功能, 在道路除冰、建筑采暖、结构健康监测等领域展现出巨大应用潜力, 准确测量其电阻率成为评估材料性能与指导工程应用的关键。本文系统综述当前导电混凝土电阻率测量的两电极法与四电极法, 通过分析比较揭示其优缺点与适用范围, 为研究与工程实践提供参考[58]。

两电极法作为电阻测量基础方法, 因电路结构简洁、操作便捷, 在导电混凝土电阻率测试中广泛应用。该方法通过在试样两端设置电极直接测量电压和电流计算电阻值, 依据电极布置方式可分为外贴式和埋入式。韩宝国在碳纤维水泥石电阻测试研究中, 对两种电极放置方式系统比较发现, 插入式电极较粘贴式电极能提供更稳定准确的测量结果, 因其与混凝土试样接触更紧密, 有效减少接触电阻干扰。预埋电极在混凝土凝固时与基体紧密结合, 避免后期粘贴界面问题, 既满足实验室精确测量要求, 也适用于建筑工程现场电阻率检测。侯作富等人在碳纤维混凝土导电性研究中发现, 电阻率测量结果与电极面积显著相关, 随着测量电极面积增大, 电阻率减小, 此效应源于接触电阻影响随电极面积增大而降低, 大尺寸电极提供更多电流通路, 平均化局部接触不良影响, 提高测量结果可靠性[59]。

四电极法为克服两电极法接触电阻问题而发展, 采用四个电极测量: 外侧两个电极负责电流激励, 内侧两个电极负责电压测量, 显著提高电阻率测量准确性。测量时, 电流通过外侧电极注入试样形成稳定电流场, 内侧电压电极精准测量试样特定区域内电位差。因电压测量回路输入阻抗极高, 流经电压电极电流极小, 电极接触电阻压降可忽略, 测量结果主要反映试样本体电阻率, 极大降低接触效应影响。四电极法特别适用于导电混凝土等具有中等电阻率材料的测量, 研究表明, 对于掺有碳纤维、钢纤维等导电相的混凝土材料, 四电极法能准确反映导电相分布和含量对材料电阻率的影响, 较两电极法, 其测量结果受试样表面状态和电极接触情况影响更小, 具有更高重复性和可靠性[60] [61]。

本文综述的两电极法与四电极法各具特色, 适用场景不同。两电极法操作简便、易于实施, 但精度有待提升; 四电极法精度高, 但系统复杂。随着导电混凝土应用领域拓展, 电阻率测量技术将不断发展完善, 为智能建筑材料研发与应用提供坚实技术支持。同时, 新兴测量技术涌现将深化对导电混凝土电学行为的认知, 推动材料设计与性能优化革新。

4. 灌注桩超灌电法监测系统(现有的监测技术手段)

基于对大量文献的系统梳理与深入市场调研, 我们发现当前市场上已有多款针对混凝土灌注桩超灌监测的专用仪器。尽管这些仪器在实现路径、精度控制或功能细节上各有差异, 但其核心监测原理具有高度一致性, 此共性原理是该类仪器高效运作的技术支撑。以下, 我们将聚焦于这一普遍采用的监测原理展开详细阐述与分析。在混凝土灌注桩施工质量控制与界面鉴定的研究进程中, 前期研究为深入理解混凝土灌注桩内部复杂介质体系的物理特性提供了关键指引。通过广泛查阅国内外前沿文献并结合实际工程案例, 我们对混凝土灌注桩内混凝土、泥浆、地下水等多种介质的物理特性, 如密度、电阻率、声波

传播速度等关键指标, 进行了深入剖析。旨在挖掘出能够精准表征混凝土上界面特征且具有高度辨识度的物理特征参数, 为后续混凝土上界面的精确鉴定奠定坚实的理论基础(见图 3) [62]-[64]。

基于前期对物理特性的深入分析, 研发团队设计并制造了专属监测探头。该探头融合先进传感器技术, 可精准捕捉所关注的物理特征参数数据。在模拟试验阶段, 为实现混凝土灌注过程中物理特性的全方位、动态化精准监测, 将高精度、多功能监测模块嵌入灌注桩桩身内部预设的特定标高位置下方, 确保监测点能全面覆盖并准确反映桩身不同深度处的混凝土灌注状态, 保障测试数据的准确性与代表性[65] [66]。在模拟灌注桩试验装置中, 制备符合工程实际配比要求的混凝土, 并将其缓缓注入灌注桩模拟装置的漏斗。同时, 采用人工震荡方式对漏斗进行有节奏的操作, 以打破混凝土在漏斗内可能形成的局部团聚或堵塞现象, 确保混凝土以均匀、连续的流态流入模拟灌注桩。若混凝土在漏斗中堵塞或流动不畅, 会破坏灌注过程的连续性, 降低施工效率, 还会严重影响所采集物理特征数据的准确性与可靠性, 进而影响研究成果的正确性[67]。

随着混凝土灌注作业启动, 控制主机以内置的高性能数据采集系统为核心, 按预设时间间隔采集来自各监测探头的物理特征参数数据。这些数据迅速传输至控制主机, 与前期通过大量实验与严谨理论分析确定的纯混凝土参数预定值进行比对与剖析。控制主机凭借先进算法模型对海量数据进行实时处理与精准判断, 捕捉灌注桩内介质物理特性的微妙变化趋势。一旦监测到介质参数达到或接近预设的纯混凝土参数阈值, 表明当前灌注层已达到设计要求的密实度与均匀性标准, 控制主机将迅速启动报警机制, 通过声光信号或远程通讯向施工人员发出停止灌浆指令。施工人员接收到警报后, 需立即中止灌浆作业, 并对已完成灌注部分进行检查与确认, 确保灌注桩质量符合工程规范与设计要求[68]。

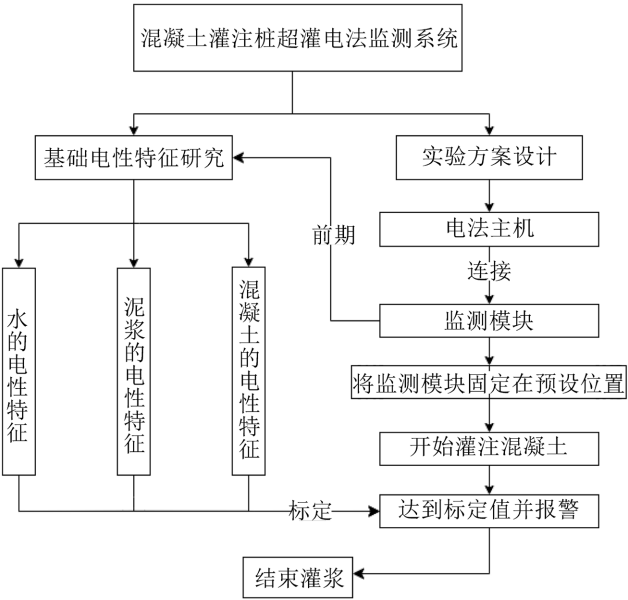


Figure 3. Monitoring principle diagram
图 3. 监测原理图

5. 混凝土灌注桩超灌电法研究进展

在建筑工程中, 灌注桩作为一种常见的基础形式, 其施工质量直接关系到整个建筑物的稳定性与安全性。然而, 灌注桩施工过程中混凝土超灌量难以精准控制的问题长期存在, 这不仅造成大量混凝土材料的浪费, 还增加了施工成本, 同时对施工质量控制的精度产生不利影响。为了有效解决这一问题, 电

法监测技术逐渐受到关注,并在灌注桩施工质量控制中展现出巨大潜力。国内研究通过模型试验和现场应用,验证了电阻率法在区分泥浆与混凝土界面、判断混凝土灌注高度等方面的有效性。研究者围绕电阻率法的应用机理,详细阐述了模型试验装置的设计与实现过程[69][70]。通过自制的测试系统,模拟不同工况下的灌注过程,成功捕捉到了桩顶标高界面物质的电阻率突变特征。试验结果表明,电阻率法能够准确识别混凝土与泥浆、空气或水的界面,为实际工程中的界面判断提供了可靠依据。

中北大学学者赵聪针对灌注桩超灌这一工程难题,开展了基于二电极法电阻率测量的研究。在研究过程中,赵聪团队通过精心设计的模型试验,对电极的尺寸、形状、埋深以及间距等关键参数进行了全面且系统的优化工作。研究表明,当电极宽度与埋深均为 30 mm 时,测量稳定性最优,且棒状电极与片状电极性能高度一致(见图 4~6)。在现场应用中,该系统可清晰区分泥浆与混凝土界面,并利用电极信号时差准确判断混凝土灌注高度,为超灌控制提供了有力技术支撑。尤其棒状电极长度为 30 mm 时,抗干扰性表现突出,可作为片状电极的有效替代应用于工程实践[71]。

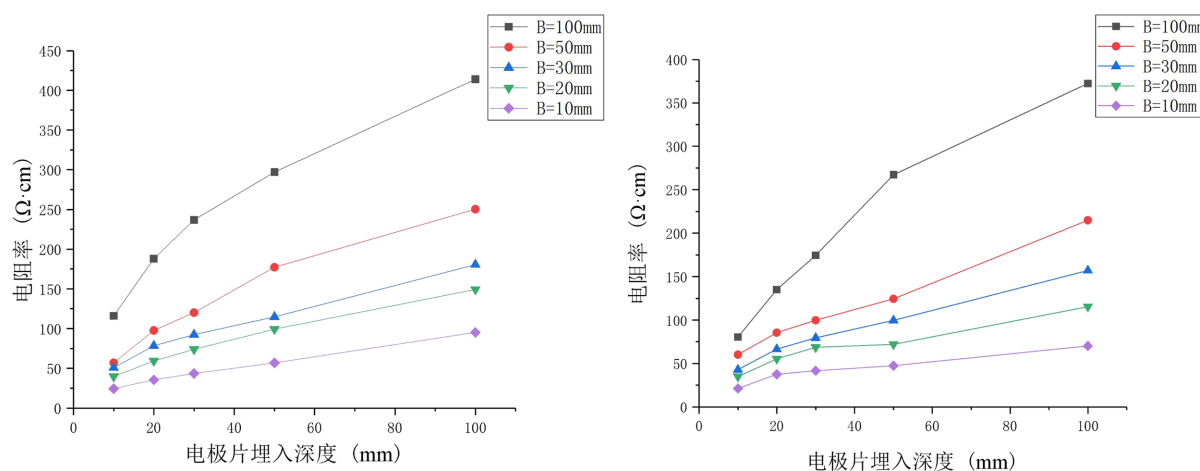


Figure 4. Electrode pad burial depth study (B represents burial depth)

图 4. 电极片埋深研究(B 为埋深)

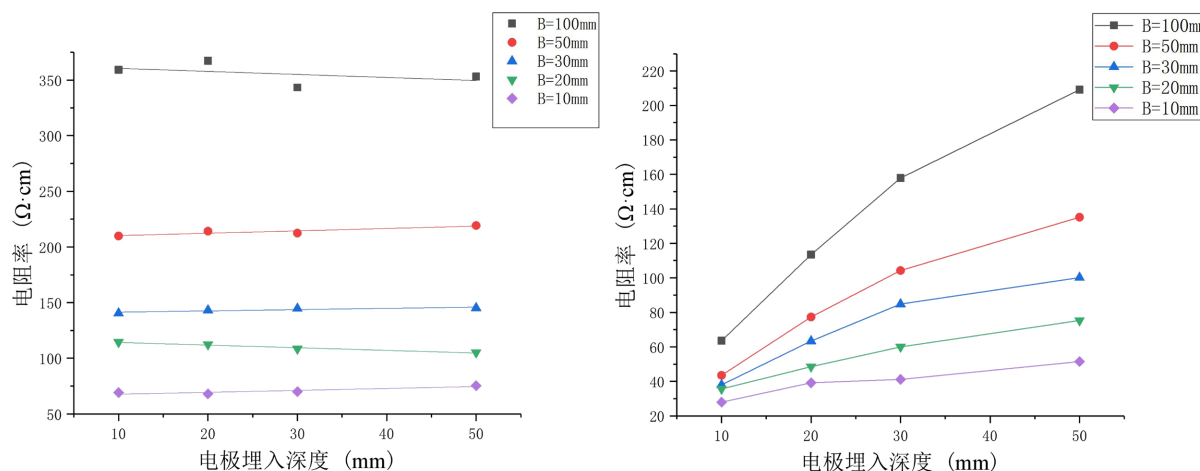


Figure 5. Electrode rod burial depth study (B represents burial depth)

图 5. 电极棒埋深研究(B 为埋深)

此外,国内其他研究者也针对电阻率法在灌注桩监测中的应用展开了一系列研究。通过建立灌注桩

混凝土灌注模型试验装置,系统而深入地分析了在不同介质(如空气和自来水)条件下,混凝土灌注过程中电阻率的变化规律。研究发现,在灌注过程中,电阻率的变化呈现出介质稳定阶段、介质混凝土过渡阶段以及混凝土稳定阶段三个鲜明的阶段。当介质为空气(模拟干灌桩)时,电阻率在过渡阶段急剧下降;而当介质为自来水(模拟水下灌注)时,电阻率则呈现出阶梯式的下降趋势(见图7)。这种差异为工程实践中判断桩顶混凝土的状态提供了至关重要的依据,使得施工人员能够通过实时监测电阻率的变化来精确控制混凝土的灌注量,从而有效减少材料的浪费[72]。

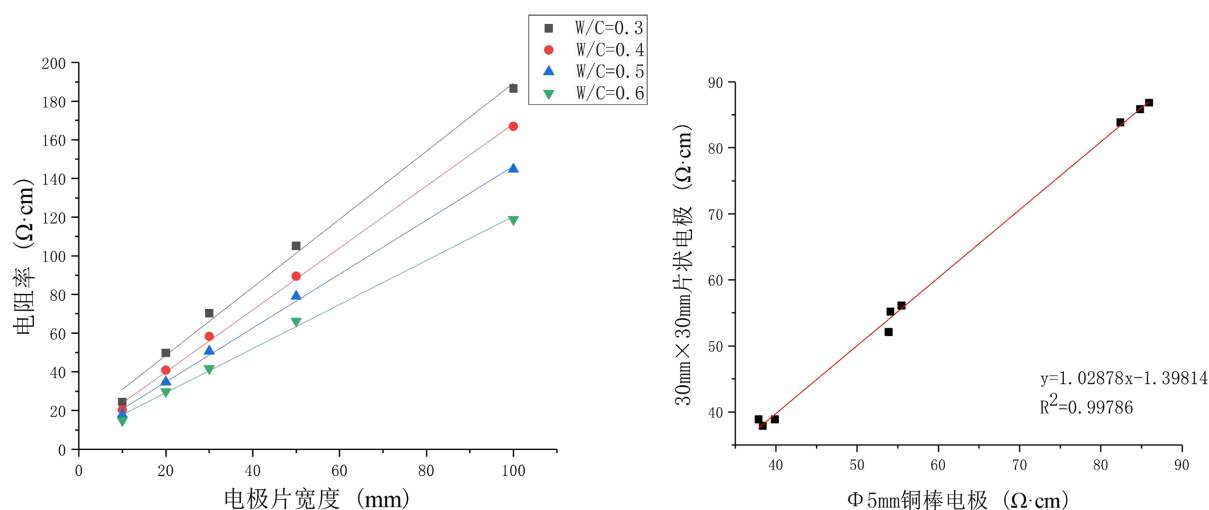


Figure 6. Comparative study of electrode pads and electrode rods (W/C represents the width of the electrode sheet)

图6. 电极片与电极棒对比研究(WC 为电极片宽度)

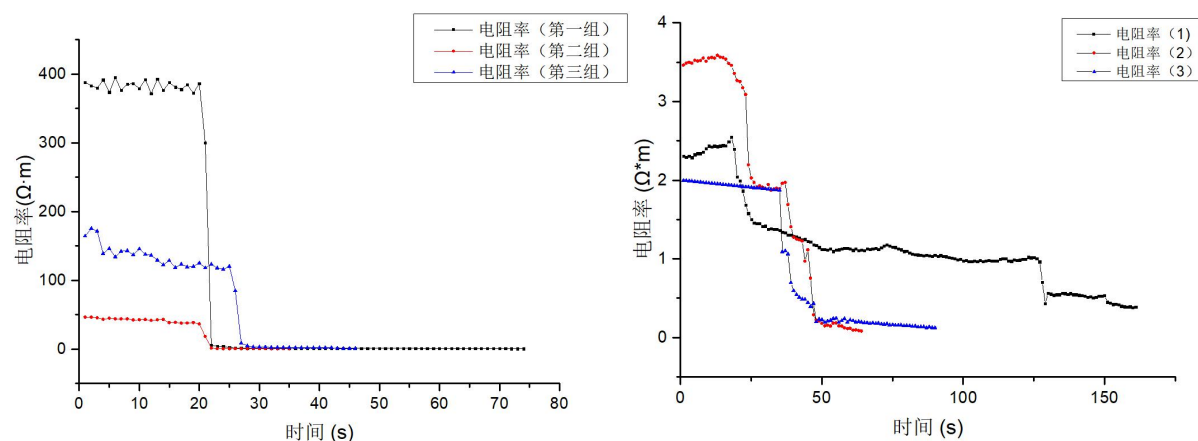


Figure 7. The variation trend of resistivity for air and water as media

图7. 介质为空气和水的电阻率变化趋势

国外一些研究团队采用多种电法监测方法对灌注桩施工过程进行监测。高密度电阻率法通过在灌注桩周围布置大量电极,获取详细的地质电阻率分布信息,从而对灌注桩的施工情况进行全面评估。该方法能够提供高分辨率的电阻率图像,有助于发现潜在的地质异常和施工缺陷。电磁法则利用电磁感应原理,检测灌注桩内部及周围介质的电磁特性变化,实现对混凝土灌注过程的监测。电磁法具有非接触性、快速响应等优点,适用于不同施工环境下的监测需求[73][74]。国外研究不仅关注电阻率等电学参数的变化规律,还注重将电法监测技术与先进的信号处理算法、机器学习算法相结合。通过机器学习算法对大

量的电法监测数据进行训练和分析, 建立混凝土灌注高度与电学参数之间的精确模型, 从而实现对混凝土灌注高度的实时、准确预测。这种结合提高了监测数据的处理效率和准确性, 为灌注桩施工的智能化监测提供了新的思路和方法[75] [76]。

在灌注桩施工电法监测技术的研究进程中, 国内外呈现出不同的发展态势。国内研究聚焦于电阻率法, 通过精心设计的模型试验与实际工程现场应用, 持续优化该方法的测量参数, 提升其应用效果, 在电阻率法的应用机理、模型试验装置设计以及不同介质下电阻率变化规律等方面取得了较为深入的研究成果, 且在现场应用中成功实现了清晰区分泥浆与混凝土界面、准确判断混凝土灌注高度等目标, 为超灌控制提供了有效的技术支撑。然而, 相较于国外, 国内在监测方法的多样性上存在不足, 国外研究除电阻率法相关探索外, 还采用了高密度电阻率法、电磁法等多种电法监测方法, 高密度电阻率法可获取更详尽的地质电阻率分布信息, 利于全面评估施工情况, 电磁法则凭借非接触性和快速响应的优势, 适用于不同施工环境, 为灌注桩施工监测提供了更多选择。同时, 国内在将电法监测技术与先进算法结合方面相对滞后, 国外研究注重将电法监测技术与信号处理算法、机器学习算法深度融合, 通过构建精确模型实现对混凝土灌注高度的实时、精准预测, 显著提高了监测数据的处理效率和准确性, 展现出更强的研究深度与应用创新性。在实践应用与推广方面, 国内研究虽取得一定成果, 但应用的广泛性和推广程度有待加强, 而国外研究凭借多种电法监测方法与先进算法的有机结合, 为灌注桩施工的智能化监测提供了更为全面的解决方案, 更有可能在工程实践中得到广泛应用与推广。国内在电阻率法的研究和应用上虽有一定建树, 但在监测方法多样性、研究深度与应用创新性以及实践应用与推广程度等方面与国外仍存在一定差距。未来, 国内研究可借鉴国外先进经验, 积极拓展电法监测方法, 强化与先进算法的结合, 以提升监测数据处理效率和准确性, 推动灌注桩施工电法监测技术向智能化方向发展, 并加强研究成果在实践中的应用与推广, 为建筑工程的质量控制和成本降低提供更为有力的技术支持[77] [78]。

6. 讨论与展望

6.1. 主要问题剖析

(1) 国内外在电法监测技术标准化和规范化方面均存在不足, 监测方法与数据处理标准有差异。与国外相比, 国内在电法监测技术与先进算法融合方面的研究较少。国外结合先进算法提高了监测数据处理效率和准确性; 国内虽验证电阻率法有效性, 但在监测数据深度分析和挖掘上需加强。

(2) 灌注桩电法监测中, “钢筋笼干扰”严重影响监测信号准确性与可靠性, 亟待解决。钢筋笼作为灌注桩的重要组成部分, 在电法监测中会产生强烈的电磁干扰。当电法监测设备发射的电场或磁场信号与钢筋笼相互作用时, 会在钢筋笼表面诱导出电流, 进而产生二次电场或磁场。这些二次场与原监测信号相互叠加、干扰, 使得监测设备接收到的信号变得复杂且混乱, 难以从中准确提取出反映桩体真实状况的有效信息。

(3) 现有的电法监测研究主要集中在灌注桩施工过程中的短期监测, 对于灌注桩使用过程中的长期监测和稳定性研究相对较少。灌注桩在使用过程中会受到各种环境因素和荷载作用的影响, 其内部及周围介质的电学特性可能会发生变化。因此, 开展灌注桩长期监测与稳定性研究, 建立长期监测数据库, 分析灌注桩在使用过程中的电学特性变化规律, 对于保障灌注桩的长期安全性和稳定性具有重要意义。

6.2. 未来展望

(1) 构建普适性监测标准, 完善标准化支撑体系, 明确参数异常判据量化阈值。电法监测参数的敏感性分析与定量建模是技术推广的关键挑战。混凝土配比、施工工况及地层物质不同均显著影响电性响应, 电阻率、极化率等核心参数在不同灌注条件下的响应敏感度需系统化。如介质电性参数相对标定值异

常波动阈值不超过 10%, 或水化反应致电阻率 ρ 降幅阈值大于 5%; 同时, 开发适应多源干扰的敏感性分析模型, 为参数动态解读提供可复现评估框架。

(2) 未来, 拟采用科学系统的研究方法解决“钢筋笼干扰”问题。建立简化物理模型, 考量钢筋笼几何结构、材料特性及布置, 确定与周围介质相对位置, 还原实际模拟干扰机制; 梳理相关领域成果, 借鉴方法思路完善认知。用有限元仿真分析, 将模型导入软件, 设定条件模拟有、无钢筋笼时信号传播, 对比差异量化其对信号幅度、相位等关键指标的影响。基于量化结果, 优化电极布设位置, 对比钢筋笼内外侧布设效果寻找最优方案; 深入研究适用于钢筋笼干扰环境的数据校正算法, 如机器学习或结合信号处理理论的算法, 校正还原数据、提高信号质量。

(3) 部署集成无线通讯技术的传感网络模块, 实现对施工区域内灌注桩灌注过程的实时、远程集中监控, 破解传统人工现场监测的效率与精度瓶颈。远程监控平台实时采集并传输各桩位浆液高度、灌注速率等关键参数, 为管理者提供全局性、高时效性施工态势感知。基于精准数据反馈, 系统可动态优化灌注控制策略, 提高混凝土灌注量控制精度, 减少超灌或欠灌导致的材料浪费, 在确保桩基质量的同时, 降低工程成本, 提升资源利用效率。

参考文献

- [1] 李化建, 谢永江, 易忠来, 等. 混凝土电阻率的研究进展[J]. 混凝土, 2011(6): 35-40.
- [2] Villagrán Zaccardi, Y.A. and Di Maio, Á.A. (2014) Electrical Resistivity Measurement of Unsaturated Concrete Samples. *Magazine of Concrete Research*, **66**, 484-491. <https://doi.org/10.1680/mac.13.00207>
- [3] de Bem, D.H., Lima, D.P.B. and Medeiros-Junior, R.A. (2018) Effect of Chemical Admixtures on Concrete's Electrical Resistivity. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, **36**, 174-187. <https://doi.org/10.1108/ijbpa-11-2017-0058>
- [4] 刘李斌. 基于不同养护方式下混凝土表面电阻率影响因素试验研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [5] 梁利生, 任瑜强, 杨帆, 等. 混凝土再生骨料——赤泥充填材料的抗压强度及电阻率特性研究[J]. 混凝土, 2022(7): 87-90.
- [6] 关海照. 电阻率检测混凝土灌注桩质量情况的可行性[J]. 科技创新与应用, 2017(26): 90-91.
- [7] 胡续. 基于电法与压强控制混凝土灌注桩超灌量试验研究[C]//中国地球物理学会. 2024 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题十九 城市地下介质成像和探测、专题二十 现代工程地球物理技术进展与应用. 2024: 62-65.
- [8] 李江海. 高密度电法在横泉水库塑性混凝土防渗墙质量检测中的应用[J]. 水利建设与管理, 2009, 29(1): 37-39.
- [9] 刘盛东, 吴荣新, 张平松, 等. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J]. 煤炭科学技术, 2001(4): 18-19+22.
- [10] 刘客, 侯龙清, 李明东, 等. 钻孔灌注桩沉渣厚度检测技术发展和展望[J]. 土工基础, 2019, 33(3): 379-383.
- [11] 薛云峰. 混凝土防渗墙质量控制及检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [12] 牛维宏, 徐清, 党玉栋, 等. 湿养护方式对混凝土表面电阻率影响的试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 538-542+549.
- [13] 卢则阳, 毕然. 超深泥浆护壁灌注桩桩顶标高测定方法[J]. 施工技术, 2010, 39(S2): 36-38.
- [14] 牛维宏, 徐清, 张凯, 等. 混凝土表面电阻率影响因素试验研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(4): 22-26.
- [15] 钱觉时, 徐姗姗, 李美利, 等. 混凝土电阻率测量方法与应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 37-42.
- [16] 杨文, 吕林女, 吴静, 等. 释水因子的吸水与释水性能对混凝土电阻率的影响[J]. 公路, 2008(5): 147-151.
- [17] 张平松, 郭立全, 胡泽安, 等. 混凝土结构隐患快速勘探技术研究现状与分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2950-2955.
- [18] 谭伟, 李洪玲, 洪成林, 等. 电解质对离子导电混凝土电阻率的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2014, 32(4): 496-499.
- [19] 李亮亮, 卢士涛, 冯玉国, 张战胜, 李景涛, 柴霞. 低标高桩顶水下钻孔灌注桩混凝土超灌高度控制装置研制[J].

- 施工技术, 2017, 46(1): 36-38.
- [20] Pan, H., Qiu, T. and Tong, L. (2024) Field Monitoring of the Movements and Deformations of Two Subway Tunnels during the Construction of an Overcrossing Tunnel: A Case Study. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **14**, 1471-1486. <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00801-0>
- [21] Tong, Z., Zhang, D., Zhou, X., Chen, B. and Zhang, H. (2022) Study of Interface Monitoring Technology for Bored Concrete Infill Piles. *Journal of Physics: Conference Series*, **2390**, Article 012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2390/1/012051>
- [22] 王兵, 韩军, 杨世鹏, 等. 一种灌注桩超灌混凝土提前处理工装的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(2): 66-68.
- [23] 王海若. 超声-回弹-电阻率综合法测定混凝土强度的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [24] 王立霞. 一种改进的混凝土电阻率测量方法[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(12): 52-56.
- [25] Cao, Z. and Wei, Y. (2021) Research and Design of Over-Irrigation Control System for Underwater Pouring Concrete of Pile Foundation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **647**, Article 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/647/1/012087>
- [26] Qiao, C., Moradillo, M.K., Hall, H., Ley, M.T. and Weiss, W.J. (2019) Electrical Resistivity and Formation Factor of Air-Entrained Concrete. *ACI Materials Journal*, **116**, 85-93. <https://doi.org/10.14359/51714506>
- [27] Bourreau, L., Bouteiller, V., Schoefs, F., Gaillet, L., Thauvin, B., Schneider, J., et al. (2019) Uncertainty Assessment of Concrete Electrical Resistivity Measurements on a Coastal Bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, **15**, 443-453. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1557703>
- [28] 宋传旺, 郭成龙, 李运红, 等. 基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 43-52.
- [29] 宋康, 张维科, 张华雨, 等. 基于电阻率法的灌注桩监测系统分析[J]. 四川水泥, 2025(5): 147-149.
- [30] 汪天翼, 尹健民, 肖国强. 高密度电阻率法检测混凝土缺陷的模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2003(4): 32-34.
- [31] Xiao, L., Li, Z. and Wei, X. (2007) Selection of Superplasticizer in Concrete Mix Design by Measuring the Early Electrical Resistivities of Pastes. *Cement and Concrete Composites*, **29**, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.015>
- [32] 曾晓辉, 隋同波, 范磊, 等. 采用电阻率法快速推测水泥 28 d 抗压强度[J]. 水泥, 2009(3): 44-45.
- [33] 曾晓辉, 隋同波, 宓振军, 等. 电阻率法测定水泥的凝结时间[J]. 水泥, 2009(1): 43-45.
- [34] 曾晓辉, 隋同波, 李宗津. 水泥水化放热与电阻率变化[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(4): 601-604.
- [35] 隋同波, 曾晓辉, 谢友均, 等. 电阻率法研究水泥早期行为[J]. 硅酸盐学报, 2008(4): 431-435.
- [36] 魏小胜, 肖莲珍. 用电阻率法确定混凝土结构形成的发展阶段及结构形成动力学参数[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(2): 171-179.
- [37] 魏小胜, 肖莲珍. 电阻率法测定硅酸盐水泥水化活化能[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(4): 676-681.
- [38] 魏小胜, 肖莲珍, 崔登国, 等. 早龄期混凝土的力学和电性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008(6): 52-55.
- [39] 张丽君, 何真, 梁文泉. 电阻率法研究矿物掺合料对水泥早期水化的影响[J]. 混凝土, 2004(3): 32-35.
- [40] 肖忠明. 利用水泥电性能进行水泥物理性能测试的研究[J]. 水泥, 2007(6): 45-48.
- [41] 魏小胜, 肖莲珍, 李宗津. 电阻率法快速测定水泥强度的原理[C]//中国硅酸盐学会混凝土水泥制品分会高性能混凝土委员会, 湖北省建协混凝土专业委员会, 武汉市混凝土协会, 中建三局商品混凝土供应站. HPC2002 第四届全国高性能混凝土学术研讨会论文集. 2002: 187-190.
- [42] Backe, K.R., Lile, O.B. and Lyomov, S.K. (2001) Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity. *SPE Drilling & Completion*, **16**, 201-207. <https://doi.org/10.2118/74694-pa>
- [43] Li, Y. and Prequel-Moreno, F. (2014) Effect of Elevated Temperature Curing on Compressive Strength and Electrical Resistivity of Concrete with Fly Ash and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. *ACI Materials Journal*, **111**, 531-542.
- [44] Wang, Z., Zeng, Q., Wang, L., Yao, Y. and Li, K. (2013) Characterizing Blended Cement Pastes under Cyclic Freeze-Thaw Actions by Electrical Resistivity. *Construction and Building Materials*, **44**, 477-486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.042>
- [45] 桂志华. 氯离子侵蚀条件下混凝土中钢筋锈蚀模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [46] Sato, T. and Beaudoin, J.J. (2010) Coupled AC Impedance and Thermomechanical Analysis of Freezing Phenomena in Cement Paste. *Materials and Structures*, **44**, 405-414. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9635-3>
- [47] Ding, Y., Huang, Y., Zhang, Y., Jalali, S. and Aguiar, J.B. (2015) Self-Monitoring of Freeze-Thaw Damage Using

- Triphasic Electric Conductive Concrete. *Construction and Building Materials*, **101**, 440-446.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.135>
- [48] 肖舟, 王俊雄, 吴罡. 一种便携式水下灌注桩桩顶混凝土超灌高度控制装置研究[J]. 城市勘测, 2024(6): 204-208.
- [49] Anonymous (2013) The Effects of Placement Conditions on the Quality of Concrete in Large-Diameter Bored Piles-Comment. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **55**, 116.
- [50] Morris, W., Vico, A. and Vázquez, M. (2004) Chloride Induced Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Concrete Resistivity Measurements. *Electrochimica Acta*, **49**, 4447-4453. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.001>
- [51] 王晓玉, 吴荣新. 基于自适应圆滑约束最小二乘的直流电阻率法反演[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(3): 163-165.
- [52] 吴荣新, 刘盛东, 张平松. 双巷并行三维电法探测煤层工作面底板富水区[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 454-457.
- [53] 吴荣新, 刘盛东, 周官群. 高分辨地电阻率法探测煤矿地质异常体[J]. 煤炭科学技术, 2007(7): 33-34+38.
- [54] 吴荣新, 徐辉. 矿井掘进工作面富水区多点电源高分辨电法探测[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 123-130.
- [55] 张平松, 李峰, 吴荣新. 二维电测深快速反演在高密度电法中的应用[J]. 西部探矿工程, 2003(1): 39-40.
- [56] 张卫, 吴荣新, 付茂如, 等. 三维并行电法在工作面顶板富水区探测中的应用[J]. 中国煤炭, 2011, 37(6): 49-51.
- [57] 张成乾, 吴荣新, 杨伐, 等. 直流电法超前探测技术在巷道掘进中的应用与研究[J]. 勘察科学技术, 2015(5): 61-64.
- [58] 赵恒宝, 赵尚传. 混凝土电阻率研究现状与进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(3): 163-167.
- [59] 路军, 咸永珍. 两电极法探究混凝土电阻率[J]. 山西建筑, 2010, 36(35): 140-141.
- [60] 张贺, 杨辉, 俞海勇. 对四电极法测试混凝土表面电阻率影响因素的研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(1): 9-12.
- [61] 张贺, 杨辉, 俞海勇. 混凝土表面电阻率与电通量的相关性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(6): 11-14.
- [62] 张晓双, 张晓凤, 韩云山, 等. 灌注桩超灌监测系统标定方法的优化设计与应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1989-1994.
- [63] 王宁. 混凝土电阻率检测系统[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.
- [64] 吴新辉. 混凝土灌注桩超灌问题探讨[J]. 住宅与房地产, 2018, (15): 240.
- [65] 李波, 雷斌, 黄凯, 等. 灌注桩混凝土顶面标高监测及超灌控制施工技术[C]//亚太建设科技信息研究院有限公司. 2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 深圳: 《施工技术》杂志社, 2021: 430-433.
- [66] 张国强, 曹惠宾. 水下混凝土灌注标高定位研究[J]. 地质装备, 2006(2): 33-36.
- [67] 祝宏文. 钻孔灌注桩混凝土超灌控制研究[J]. 路基工程, 2020(4): 181-183+188.
- [68] 周旭. 混凝土灌注桩界面智能监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [69] 段景朝, 郭中德, 王亚斌. 桩基混凝土超浇预警装置的设计与应用[J]. 四川水力发电, 2016(3): 59-60+88.
- [70] 陈凡星. 基于改进后水泥基传感器对混凝土电阻率影响因素及性能表征研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2020.
- [71] 赵聪. 灌注桩超灌监测系统二电极法电极形式试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2020.
- [72] 姚蒙. 基于电阻率法控制灌注桩混凝土超灌量的模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2019.
- [73] 董臻. 基于电阻率的混凝土抗渗性测试方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [74] 刘海川. 电阻率法在混凝土收缩开裂与应力损伤监测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [75] 徐东亮. 机敏混凝土结构的电阻率层析成像研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [76] 徐宗南. 混凝土电阻率监测和基于电阻率的混凝土性能表征[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [77] Favouritism, G.C. and Day, P.W. (2013) The Effects of Placement Conditions on the Quality of Concrete in Large-Diameter Bored Piles: Technical Paper. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **54**, 86-93.
- [78] 徐德, 田正宏, 姜林峰. 基于电阻率和支持向量机算法的混凝土振捣范围预测[J]. 混凝土, 2021(12): 141-146.